

Ivana MAHDALOVÁ¹

ZÁSADY BEZPEČNÉHO NÁVRHU OKRUŽNÍ KŘÍŽOVATKY

PRINCIPLES OF ROUNDABOUT SAFE DESIGN

Abstrakt

V článku jsou prezentovány hlavní zásady bezpečného uspořádání okružní křižovatky, které jsou výsledkem výzkumného projektu Ministerstva dopravy České republiky číslo CG911-008-910 Vliv geometrie stavebních prvků na bezpečnost a plynulost provozu na okružních křižovatkách a možnost predikce vzniku dopravních nehod. Výzkum byl prováděn na početném souboru okružních křižovatek na základě hodnocení nehodovosti v poměru k intenzitám dopravy. Po srovnání geometrie a relativní nehodovosti vyplynuly závěry pro navrhování okružních křižovatek. Pozornost je v článku věnována nejdůležitějším faktorům ovlivňujícím bezpečnost na okružní křižovatce.

Klíčová slova

Bezpečnost dopravy, okružní křižovatka, relativní nehodovost, dosažitelná rychlost.

Abstract

The paper presents the main principles of roundabout safety layout. It is result of the research project for the Ministry of Transport of Czech Republic No. CG911-008-910. The name of the project is Influence of structural elements geometry on safety and fluency of operation on roundabouts and possibility of rise crashes prediction. The research includes a large set of roundabouts based on the analysis accident rates in proportion to the traffic flow. The comparison of the geometry and relative accident rates resulted in recommendations for the design of roundabouts. In this article the attention is paid to the most important factors affecting safety at the roundabouts.

Keywords

Traffic safety, roundabout, crash rate, available speed.

1 ÚVOD

Okružní křižovatky jsou v poslední době často používaným typem křižovatky. Důvodem je jejich vyšší bezpečnost ve srovnání s klasickými typy úrovnových křižovatek. Okružní křižovatka s jedním jízdním pruhem na vjezdu, na okružním pásu a na výjezdu má minimální počet kolizních bodů a nemá žádné křížné body. Ale přesto se na některých okružních křižovatkách vyskytuje významně více dopravních nehod než na jiných. Podle současných poznatků souvisí bezpečnost dopravy s geometrií okružní křižovatky. Prověření této teorie bylo mimo jiné předmětem výzkumu pro Ministerstvo dopravy České republiky.

Katedra dopravního stavitelství na Fakultě stavební VŠB-Technické univerzitě Ostrava byla v letech 2009 a 2010 zapojena do dvouletého výzkumného projektu pro Ministerstvo dopravy. Projekt číslo CG911-008-910 má název Vliv geometrie stavebních prvků na bezpečnost a plynulost provozu na okružních křižovatkách a možnost predikce vzniku dopravních nehod. Tento příspěvek

¹ Doc. Ing. Ivana Mahdalová, Ph.D., Katedra dopravního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 342, e-mail: ivana.mahdalova@vsb.cz.

prezentuje některé významné zásady pro bezpečné uspořádání okružní křižovatky, které vyplynuly z výsledků řešeného projektu [3].

Pro detailní analýzu vztahu geometrického uspořádání a nehodovosti byl v rámci řešení výzkumného projektu vybrán reprezentativní soubor okružních křižovatek se zastoupením různých typů geometrického uspořádání i různé úrovně dopravního zatížení. Základní hodnocený soubor 104 tří až šestiramenných okružních křižovatek byl vybrán v rámci celého území České republiky. Základní soubor zahrnuje 87 jednopruhových okružních křižovatek a 17 dvoupruhových okružních křižovatek. Výběr odpovídá poměrnému výskytu jednotlivých typů okružních křižovatek v ČR (nejvíce je čtyřramenných, méně než 10 % je vícepruhových). Ze zkoumaného základního souboru byly v průběhu řešení vyřazeny okružní křižovatky s bypassy, připojovacími pruhy, SSZ a mini okružní křižovatky tak, aby vznikl konzistentní soubor, u kterého by bylo možno jednoznačně statisticky hodnotit vliv určitých sledovaných geometrických parametrů a dalších faktorů na nehodovost na okružní křižovatce. Redukovaný výsledný hodnocený soubor zahrnuje 69 okružních křižovatek, z toho je 59 jednopruhových a 10 dvoupruhových.

U všech křižovatek byly shromážděny údaje o dopravních nehodách evidovaných Policií ČR v letech 2007 a 2008. Údaje o nehodách, které byly evidovány v letech 2009 a 2010, nemohly být pro výzkum využity vzhledem k tomu, že došlo k významnému navýšení finanční hodnoty vzniklé škody, při které je hlášení nehody povinné. Protože většina nehod na okružních křižovatkách má za následek škody pod stanoveným finančním limitem, neposkytuje současná evidence dopravních nehod dostatečný podklad ke statistickému hodnocení nehodovosti pro účely výzkumného projektu.

Pro vybrané okružní křižovatky byly získány údaje o intenzitách dopravy. Intenzity dopravy byly získány přepočtem z celostátního sčítání dopravy, z dříve prováděných dopravních průzkumů nebo z vlastních dopravních průzkumů realizovaných přímo v rámci řešení výzkumného projektu. Pro zjištění intenzit dopravy a pro doplnění informací o chování vozidel z reálného provozu byly na některých vybraných okružních křižovatkách pořízeny videozáznamy, které byly využity také k provedení videoanalýzy konfliktních situací [2]. Následně byla na vybraných okružních křižovatkách hodnocena relativní nehodovost a její souvislost se stavebním uspořádáním. Relativní nehodovost, tj. počet nehod na milion vozidel vjíždějících do křižovatky, byla použita jako objektivní ukazatel pro srovnání bezpečnosti okružních křižovatek s různým geometrickým uspořádáním.

2 BEZPEČNOST OKRUŽNÍ KŘÍŽOVATKY

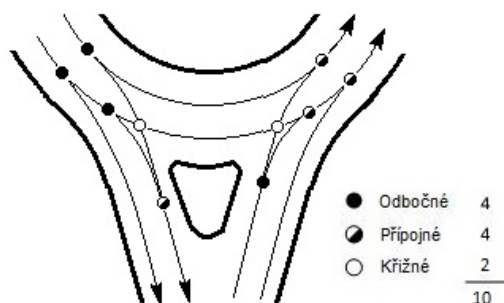
Bezpečnost okružní křižovatky je dána především:

- minimalizací celkového počtu kolizních bodů,
- eliminací křížných kolizních bodů,
- zajištěním nízkých jízdních rychlostí vozidel.

2.1 Minimalizace celkového počtu kolizních bodů

Minimalizace celkového počtu kolizních bodů je přirozeně dosažena na okružní křižovatce s jedním jízdním pruhem na okružním pásu, na vjezdech i výjezdech. Takto uspořádaná okružní křižovatka se čtyřmi paprsky má jen 8 kolizních bodů, zatímco klasická průsečná úroňová křižovatka má celkem 32 kolizních bodů.

Situace se však výrazně mění na vícepruhové okružní křižovatce klasického uspořádání s paralelními jízdními pruhy na okružním pásu. Na připojení každého paprsku s dvoupruhovým vjezdem a výjezdem na dvoupruhový okružní jízdní pás vzniká 10 kolizních bodů – viz obr. 1. Čtyřramenná okružní křižovatka se dvěma jízdními pruhy na okružním pásu i na všech vjezdech a výjezdech má na připojení paprsků celkem 40 kolizních bodů, tedy míst s potenciální možností vzniku nehod mezi vozidly. K tomu je nutno uvažovat s dalšími kolizními body vznikajícími při přejíždění mezi jízdními pruhy na dvoupruhovém okružním pásu. Praxe ukazuje, že vícepruhové okružní křižovatky jsou skutečně výrazně více nehodové ve srovnání s jednopruhovými.



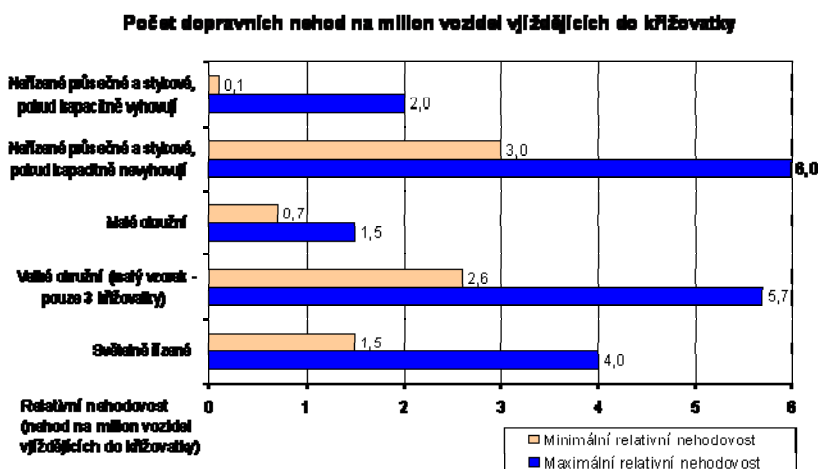
Obr. 1: Kolizní body na vjezdu a výjezdu klasické dvoupruhové okružní křižovatky

Na dvoupruhových okružních křižovatkách klasického uspořádání, ve srovnání s jednopruhovými, byla v rámci našeho výzkumu zjištěna více než čtyřnásobně vyšší průměrná nehodovost – viz tabulka 1. Jak plyne ze závěru výzkumu, je z hlediska bezpečnosti dopravy jednoznačně vhodnější okružní křižovatka s jedním jízdním pruhem na okružním pásu i na vjezdech a výjezdech.

Tab. 1: Hodnoty relativní nehodovosti na jednopruhových a dvoupruhových okružních křižovatkách

Okružní křižovatka		Relativní nehodovost za období 2007 – 2008 (počet nehod na milion vozidel vjíždějících do křižovatky)		
počet pruhů na okružním jízdním pásu	počet zkoumaných okružních křižovatek	minimální	maximální	průměrná
1	59	0	3,07	0,52
2	10	0,40	6,26	2,79

To koresponduje s již dříve publikovaným zjištěním Ústavu dopravního inženýrství hlavního města Prahy (ÚDI Praha) [5], který na svých tehdejších webových stránkách uváděl obvyklou relativní nehodovost jednotlivých typů úrovnových křižovatek v Praze – viz obr. 2.



Obr. 2: Obvyklá relativní nehodovost na úrovnových křižovatkách v Praze, rok 2005 [5]

Z grafu na obr. 2 je rovněž patrná přibližně čtyřnásobně vyšší nehodovost na dvoupruhových okružních křižovatkách ve srovnání s jednopruhovými. Podle dřívější terminologie platné v ČR se pro jednopruhovou okružní křižovátku používal název malá okružní křižovátka a pro dvoupruhovou okružní křižovátku pak velká okružní křižovátka. ÚDI Praha je od 1. 1. 2008 začleněn pod názvem Úsek dopravního inženýrství (ÚDI) do Technické správy komunikací hlavního města Prahy (TSK Praha) a jeho původní webové stránky již nejsou dostupné.

2.2 Eliminace křížných kolizních bodů

Eliminace křížných kolizních bodů je hlavním důvodem obecně vyšší bezpečnosti okružní křižovátky ve srovnání s klasickou úroňovou křižovátkou. Na jednopruhové okružní křižovatce jsou křížné kolizní body vyloučeny. Na vícepruhových okružních křižovatkách však vznikají křížné kolizní body jak na vjezdech a výjezdech (obr. 1), tak i při přejíždění mezi jízdními pruhy na okružním pásu. Přitom právě v křížných kolizních bodech mohou vznikat nehody s nejzávažnějšími následky.

2.3 Zajištění nízkých jízdních rychlostí vozidel

Zajištění nízkých jízdních rychlostí je přirozeným důsledkem směrového zakřivení jízdních drah při průjezdu okružní křižovátkou. Pro bezpečnost dopravy je ideální, aby se všechna vozidla v křižovatce pohybovala přibližně stejnou rychlostí. To usnadňuje rozhodování při dávání přednosti na vjezdu i zařazování vozidel do nadřazeného dopravního proudu a vyřazování na výjezdu. Je však potřeba vhodným stavebním uspořádáním zamezit přímému průjezdu křižovátkou a zabezpečit, aby nedocházelo ke skokové změně rychlosti při jízdě kolem následných geometrických prvků okružní křižovátky.

Doporučuje se posoudit vzájemný poměr dosažitelných rychlostí na jízdních drahách vozidel při postupném provádění navazujících dopravních pohybů, a to:

- rozdíl dosažitelných rychlostí na příjezdu k okružní křižovatce (na příjezdové komunikaci) a na směrovém oblouku jízdní dráhy na vjezdu (průjezd kolem zaoblení pravého okraje jízdního pásu na vjezdu),
- rozdíl dosažitelných rychlostí na směrovém oblouku jízdní dráhy na vjezdu (průjezd kolem zaoblení pravého okraje jízdního pásu na vjezdu) a na směrovém oblouku jízdní dráhy při průjezdu kolem středového ostrova,
- rozdíl dosažitelných rychlostí na směrovém oblouku jízdní dráhy při průjezdu kolem středového ostrova a na směrovém oblouku jízdní dráhy na výjezdu (průjezd kolem zaoblení pravého okraje jízdního pásu na výjezdu).

Dosažitelná rychlost při jízdě ve směrovém oblouku se určí v závislosti na poloměru jízdní dráhy vozidla a příčném sklonu podle obecně známého vzorce:

$$v_o = 3,6 \cdot \sqrt{R \cdot g_n \cdot (f + 0,01 \cdot p)} = \sqrt{127 \cdot R \cdot (f + 0,01 \cdot p)} \quad (1)$$

kde:

- v_o – je dosažitelná rychlost ve směrovém oblouku [km/h],
- R – poloměr směrového oblouku jízdní dráhy vozidla [m],
- g_n – normální tíhové zrychlení [m/s^2],
- p – příčný sklon ve směrovém oblouku [%] a
- f – součinitel příčného tření podle ČSN 73 6102 [1] – viz tabulka 2.

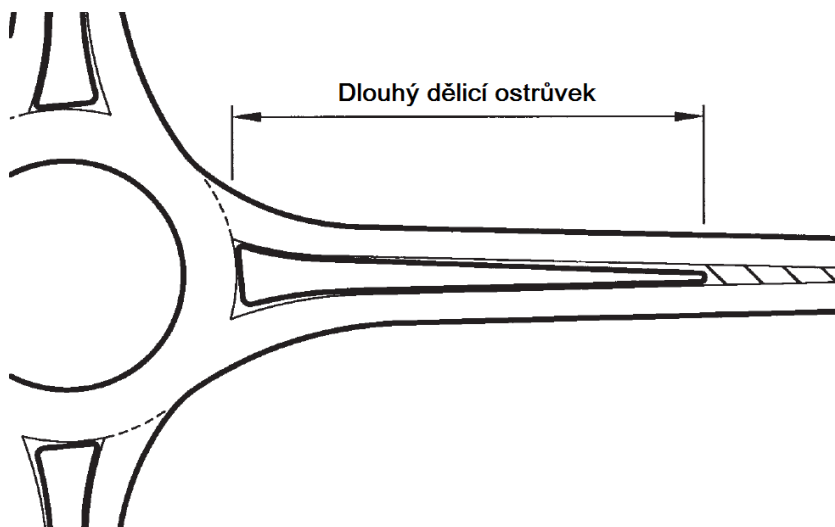
Tab. 2: Hodnoty součinitele příčného tření podle [1]

Součinitel příčného tření								
v (km/h)	60	50	40	35	30	25	20	15
f	0,17	0,19	0,23	0,25	0,28	0,31	0,34	0,40

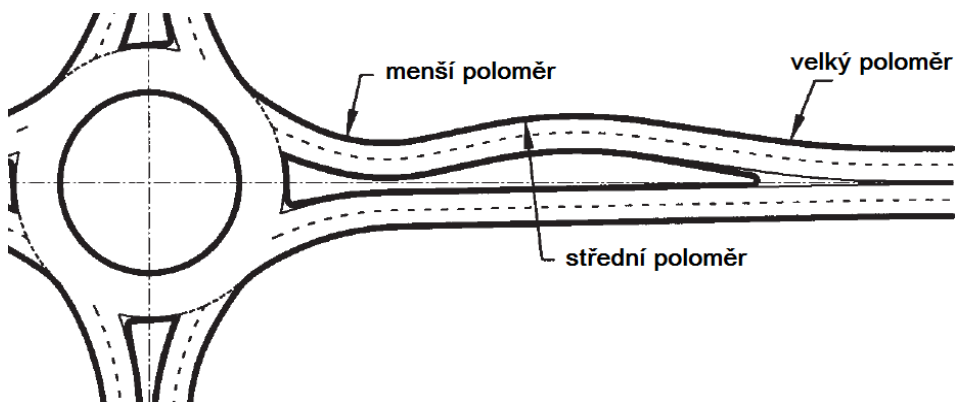
Dosažitelná rychlost na příjezdu je určena především směrovým zakřivením komunikace před vjezdem do okružní křižovatky:

1. Je-li komunikace na příjezdu vedena ve směrovém oblouku, určí se dosažitelná rychlost podle výše uvedeného vzorce (1).
2. Je-li komunikace na příjezdu vedena ve směrové přímé, nebo ve směrovém oblouku o velkém poloměru, dosažitelnou rychlost ovlivňuje zejména příčné uspořádání prostoru pozemní komunikace, popřípadě svislé a vodorovné dopravní značení:
 - Těsně přiléhající zástavba, nepříliš komfortní šířka vozovky a lemování komunikace obrubníky přispívají k udržení nízkých jízdních rychlostí. Na takto uspořádaných příjezdových úsecích místních komunikací lze očekávat dodržení rychlostního limitu 50 km/h.
 - Odsazená nebo neexistující zástavba, komfortní šířkové uspořádání komunikace a absence obrubníků na příjezdu přispívají k vyšším jízdním rychlostem, a to bez ohledu na nejvyšší dovolenou rychlost stanovenou platnými předpisy nebo místně upravenou dopravním značením. Na takto uspořádaných úsecích pozemních komunikací je nutno uvažovat s dosahovanou jízdní rychlostí 70 km/h a vyšší.

Potřebné snížení dosažitelné jízdní rychlosti na příjezdu lze zajistit zúžením zpevněné krajnice, vložením dostatečně dlouhého dělicího ostrůvku do paprsku křižovatky – viz obr. 3, vybudováním zvýšených obrubníků vymezujících minimální funkčně způsobilou šířku jízdního pásu na příjezdovém úseku pozemní komunikace, a případně vybudováním retardujícího směrového zakřivení na příjezdu – viz obr. 4.



Obr. 3: Dlouhý dělicí ostrůvek ke snížení příjezdové rychlosti podle [4]



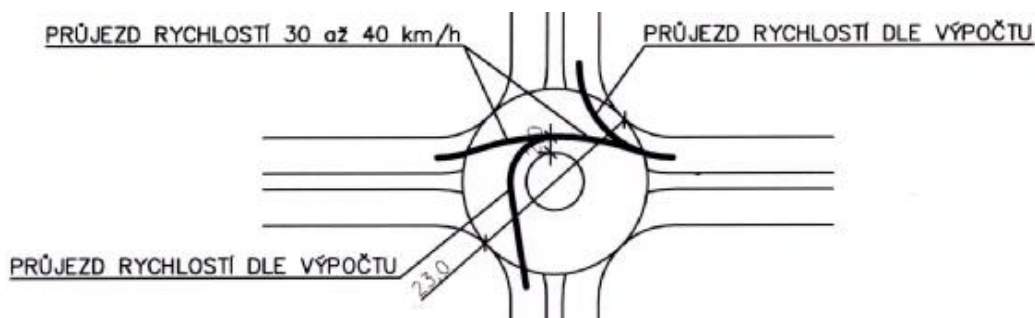
Obr. 4: Směrové zakřivení příjezdové komunikace ke snížení příjezdové rychlosti podle [4]

Ideálně by měly být porovnávané dosažitelné rychlosti shodné, z důvodu zajištění bezpečnosti a plynulosti dopravy by se neměly lišit o více jak o 20 km/h. To eliminuje potřebu náhlého prudkého brzdění, v důsledku kterého může dojít až ke smyku brzdícího vozidla nebo k nárazu zezadu nedobrzděním následujícího vozidla.

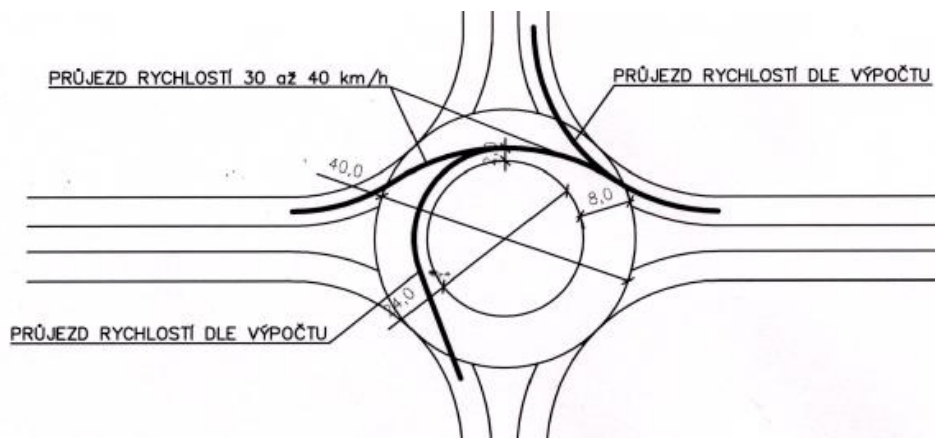
Na čtyřramenné okružní křižovatce je pro posouzení poměru rychlostí rozhodující:

1. nejrychlejší dráha pro jízdu od vjezdu k prvnímu výjezdu (odbočení vpravo),
2. nejrychlejší dráha pro jízdu od vjezdu ke druhému výjezdu (přímý průjezd),
3. nejrychlejší dráha pro jízdu od vjezdu ke třetímu výjezdu (odbočení vlevo).

Za nejrychlejší dráhu se přitom považuje nejméně zakřivená jízdní dráha vozidla odsazená o 1,5 m, nejvýše však o 2,0 m, od okrajů limitujících návrhových prvků, tj. od zaoblení pravého okraje jízdního pásu na vjezdu, od okraje středového ostrova a od zaoblení pravého okraje jízdního pásu na výjezdu.



Obr. 5: Průjezd nejmenší okružní křižovatkou o vnějším průměru $D = 23$ m (při menším průměru se již jedná o mini okružní křižovátku)



Obr. 6: Průjezd optimální okružní křižovatkou o vnějším průměru $D = 40$ m

3 HODNOCENÍ BEZPEČNOSTI OKRUŽNÍ KŘÍŽOVATKY

Jak bylo zmíněno v úvodu, do hodnoceného souboru bylo zařazeno celkem 69 okružních křižovatek rozložených po celém území České republiky, z toho 59 jednopruhových a 10 dvoupruhových. Nehodovost na typu spirálovitě uspořádané vícepruhové okružní křižovatky nebyla zjišťována s ohledem na minimální výskyt tohoto typu křižovatky v České republice v době řešení výzkumného projektu. U hodnocených křižovatek byly zkoumány geometrické parametry a relativní nehodovost, tj. počet nehod evidovaných Policií ČR na 1 milion vozidel vjíždějících do okružní křižovatky. Z výzkumu vyplynuly po srovnání geometrie a relativní nehodovosti následující závěry:

- Okružní křižovatky s jedním jízdním pruhem na okružním jízdním pásu i na vjezdech a výjezdech, umístěné na komunikacích s rychlostním limitem do 50 km/h (stavebně zajištěným), jsou jednoznačně nejbezpečnější.
- Umístění jednopruhové okružní křižovatky na komunikacích s dosažitelnou příjezdovou rychlostí 70 km/h a vyšší je provázáno zvýšením relativní nehodovosti na dvojnásobek ve srovnání s obdobnou jednopruhovou okružní křižovatkou umístěnou na komunikacích s rychlostním limitem 50 km/h.
- Okružní křižovatka s klasickým dvoupruhovým uspořádáním okružního jízdního pásu a s dvoupruhovými vjezdy a výjezdy vykazuje 4,4 krát vyšší nehodovost ve srovnání s jednopruhovou okružní křižovatkou umístěnou na komunikacích se stejnými rychlostními podmínkami na příjezdových úsecích.

Jak plyne z uvedeného hodnocení, pro zajištění maximální bezpečnosti by okružní křižovatky měly být přednostně řešeny jako jednopruhové. Současně je nutné zajistit vhodnou stavební úpravou adekvátní snížení dosažitelné jízdní rychlosti již na příjezdových úsecích komunikací před vlastním vjezdem do křižovatky. Snížování dovolené rychlosti na přímých příjezdových parscích pouze pomocí dopravního značení není dostatečně efektivní pro skutečné zvýšení bezpečnosti.

4 ZÁVĚR

Bezpečnost na okružní křižovatce je podmíněna komplexem spolupůsobících faktorů, jako jsou návrhová, dovolená a dosažitelná rychlost na vjezdech a na okružním jízdním pásu křižovatky, rozhledové poměry a pohyb chodců a cyklistů v závislosti na návrhových prvcích okružní křižovatky, umístění svislého a vodorovného dopravního značení, případně dopravního zařízení a veřejného osvětlení, a také kvalita povrchu poježděných ploch. V této souvislosti je potřeba zohlednit zejména účinky jízdy největších návrhových vozidel po prstenci středového ostrova, jehož konstrukce je

extrémně namáhána a často zde dochází ke vzniku poruch s dopadem na bezpečnost provozu. Vliv dynamických účinků kol vozidel při jízdě po povrchu prstence je možno hodnotit např. podle [6].

Na základě výzkumu je možno doporučit, aby byla věnována zvýšená pozornost korektnímu návrhu celkové geometrie okružní křižovatky. Zvláštní pozornost je potřeba věnovat návrhu okružní křižovatky na silnicích a na místních komunikacích s návrhovou rychlostí nad 50 km/h, kde je potřeba vhodnou úpravou na příjezdu k okružní křižovatce zajistit snížení rychlosti před vlastním vjezdem do křižovatky. Zvýšenou pozornost si zaslouží také návrh geometrie okružní křižovatky v podmínkách nižších intenzit dopravy, kdy minimální interakce s dalšími vozidly v dopravním proudu svádí řidiče k podvědomému zvyšování rychlosti zejména na příjezdu ke křižovatce.

Jako nevhodné se jeví použití klasického dvou a vícepruhového uspořádání okružní křižovatky. Dvoupruhové okružní křižovatky vykazují sice poněkud vyšší celodenní kapacitu, udává se 30 až 40 tisíc vozidel za den. S rostoucí intenzitou dopravy však prudce roste nehodovost a několikanásobně převyšuje nehodovost na jednopruhových okružních křižovatkách v podmínkách obdobně vysokého dopravního zatížení.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl realizován za finančního přispění Ministerstva dopravy ČR jako součást řešení výzkumného projektu CG911-008-910 Vliv geometrie stavebních prvků na bezpečnost a plynulost provozu na okružních křižovatkách a možnost predikce vzniku dopravních nehod.

LITERATURA

- [1] ČSN 73 6102 *Projektování křižovatek na pozemních komunikacích*. Praha: Český normalizační institut, 2007, pp. 180.
- [2] KŘIVDA, V. Analýza konfliktních situací na okružních křižovatkách ve Valašském Meziříčí. *Sborník vědeckých prací VŠB - Technické univerzity Ostrava, řada stavební*. 2010, X. Nr. 1, pp. 99-108. ISSN 1213-1962.
- [3] MAHDALOVÁ, I. & kol. *Závěrečná zpráva 2010 projektu CG911-008-910 Vliv geometrie stavebních prvků na bezpečnost a plynulost provozu na okružních křižovatkách a možnost predikce vzniku dopravních nehod*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, Fakulta stavební, Katedra dopravního stavitelství, 2011, pp. 22.
- [4] ROBINSON, B. W. & comp. *Roundabouts: An Informational Guide*. 1st ed. Virginia: U.S. Department of Transportation – Federal Highway Administration, 2000. 284 pp. FHWA-RD-00-067. Dostupné on-line z URL <<https://www.nysdot.gov/main/roundabouts/files/00-067.pdf>> (citováno 15. 3. 2011).
- [5] *Světelná signalizace a bezpečnost dopravy v Praze*. Praha: Ústav dopravního inženýrství hlavního města Prahy, 2005. Dostupné on-line z URL <<http://www.udipraha.cz>> (citováno 15. 9. 2005).
- [6] LAJČÁKOVÁ, G. Vplyv parametrov vozidla na interakčné sily vznikajúce medzi kolesom a jazdnou dráhou. *Sborník vědeckých prací VŠB - Technické univerzity Ostrava, řada stavební*. 2010, X. Nr. 1, pp. 183-190. ISSN 1213-1962.

Oponentní posudek vypracoval:

Doc. Ing. Daniela Ďurčanská, CSc., Žilinská univerzita v Žiline, Stavebná fakulta, Katedra cestného staviteľstva.

Ing. Martin Smělý, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací.